

Primljen: 21.08.2019.
Prihvaćen: 23.10.2019

Prethodno priopćenje
UDK: 669.1

Zavarljivost čelika visoke čvrstoće

Weldability of high tensile steel

Filip Vusić

Međimursko veleučilište u Čakovcu, Bana J. Jelačića 22a, Čakovec, Hrvatska

E - mail: filip.vusic@mev.hr

Sažetak: *Ovaj rad bavi se problematikom zavarljivosti čelika visoke čvrstoće. U teoretskom dijelu rada objašnjen je pojam zavarljivosti. Opisana je proizvodnja i specifičnosti čelika API 5L X80. Opisana je isto tako Tekken metoda ispitivanja zavarljivost čelika visoke čvrstoće.*

U eksperimentalnom dijelu rada za čelik klasifikacije API 5L X80 provedeno je ispitivanje zavarljivosti uz pomoć Tekken metode ispitivanja. Zavarljivost čelika API 5L X80 ispitana je i uz pomoć mjerenja tvrdoće na makroizbruscima iz Tekken proba metodom HV10.

Ključne riječi: *zavarljivost, čelici visoke čvrstoće, Tekken ispitivanje*

Abstract: *This paper examines the topic of welding high tensile steel. Theoretical part of this paper sheds the light on weldability. In this discourse are discussed production and specifics of steel grades API 5L X80. Tekken method test weldability of tensile steel are also listed in this paper.*

Experimental part of this research paper tests weldability of steel grades API 5L X80 conducted by the Tekken method. In addition to already described methods, weldability of steel API 5L X80 is also analysed by measuring hardness on macroabrasion by the Takken method HV10.

Key words: *weldability, high tensile steels, Tekken method*

1. Uvod

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\%C$), uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) i uz eventualni dodatak jednoga ili više legiranih elemenata. Čelici su danas najvažniji tehnički materijali u proizvodnji i primjeni. Postoje raznovrsni pristupi, ovisno o tomu s kojeg se stajališta promatraju čelici. Tako se čelici mogu karakterizirati obzirom na sljedeća obilježja: kemijski sastav; mikrostruktura; način proizvodnje; oblik i stanje; područje primjene; svojstva (Filetin i sur, 2006.).

U ovom stručnom radu poseban naglasak će se staviti na čelik klasifikacije API 5L X80 na kojemu će se provoditi i eksperimentalni dio rada.

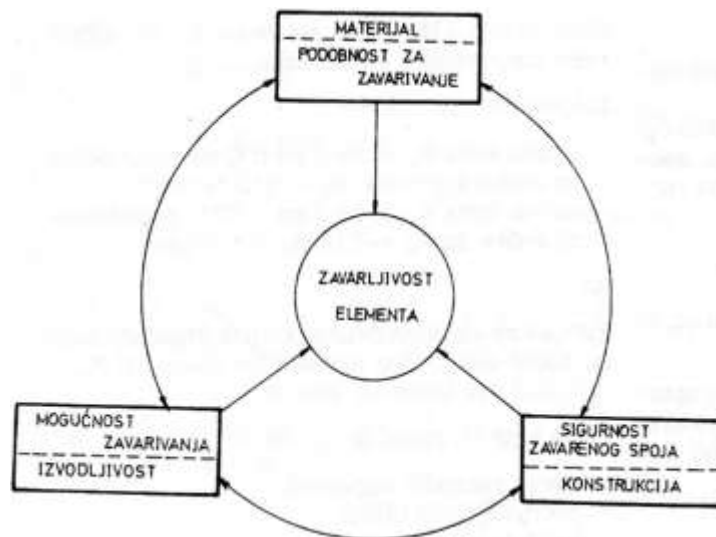
Zavarivanje po mnogima predstavlja najsloženiju proizvodnu tehnologiju, ali također od svih proizvodnih procesa zavarivanje ima najveće mogućnosti razvoja, uz osiguranje razumnih i kreativnih donošenja odluka i procjena o primjeni zavarivačkih procesa. Može se istaknuti da u zavarivanju upravo zavarljivost pojedinoga materijala definira preostale odluke koje će biti donesene pri zavarivanju pojedinoga elementa. Isto tako važno je napomenuti da zavarljivost nije moguće ispitati izravno, pojedinim standardiziranim metodama, već se zavarljivost pojedinoga čelika procjenjuje na temelju različitih metoda. Za procjenu zavarljivosti čelika visoke čvrstoće razvijene su mnoge metode. Poseban naglasak kod određivanja zavarljivosti čelika visoke čvrstoće treba se staviti na određivanje ekvivalenta ugljika kao i na mogućnosti pojave hladnih pukotina i to pomoću računskih i eksperimentalnih metoda.

2. Zavarljivost

Pojam zavarljivosti je vrlo složen problem te se teško jednoznačno određuje (Novosel i Kralj, 1991.). Često se misli da zavarljivost znači mogućnost spajanja ili popravka materijala pomoću zavarivanja. Teoretski se svi metali mogu zavariti. Činjenica da metali dobiveni iz rude mogu biti taljenjem pretvoreni u odljevke ukazuje da isto tako mogu biti i zavareni, međutim, pojam zavarljivosti nije neophodno povezan sa sposobnošću materijala da bude zavaren. Zavarljivost je mnogo širi pojam koji se odnosi na ponašanje u pogonskim uvjetima, produktivnost pri izradi i oblikovanje zavarenoga spoja (Anzulović, 1978.). Postoji znatan broj utjecajnih čimbenika na zavarljivost, a utjecaj glavnih čimbenika: materijala, konstrukcije i izvodljivosti prikazan je slikom 1, (Novosel i Kralj, 1991.). Slika 1 prikazuje međusobnu ovisnost glavnih čimbenika na

zavarljivost. Podobnost za zavarivanje zavisit će o svojstvima osnovnoga i dodatnoga materijala, na što utječu kemijski sastav, metalurška svojstva i fizikalna svojstva. Na sigurno funkcioniranje za zadane eksploatacijske uvjete utječu konstrukcijski oblik, vrsta i veličina naprezanja, debljina stjenke elementa, pogonska temperatura i medij. Mogućnost zavarivanja određuje je li moguće izvesti odgovarajući zavareni spoj predviđenim postupkom, a na to utječu priprema za zavarivanje, izvođenje zavarivanja, naknadna obrada (Novosel i Kralj, 1991.). Na slici 1 se vidi da svi prije navedeni glavni čimbenici egzistiraju zajedno i ne možemo ih promatrati zasebno, a također je naznačeno da svi oni zajedno definiraju zavarljivost elementa.

Slika 1. Utjecajni čimbenici na zavarljivost i njihovu međuzavisnost



Izvor: Novosel i Kralj, 1991.

3. Čelik API 5L X80

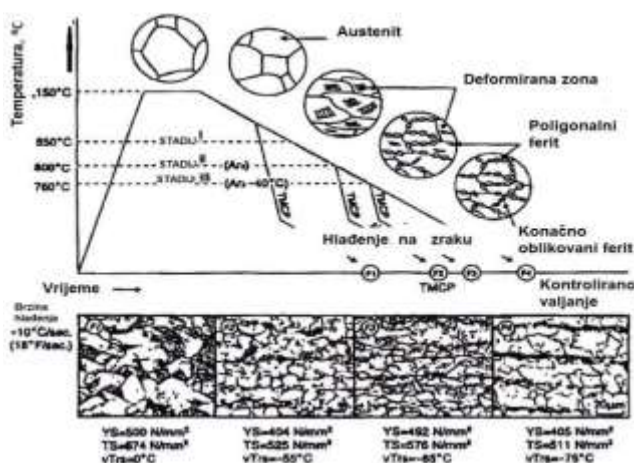
3.1. Proizvodnja čelika API 5L X80

Čelik API 5L X80 proizveden je termo – mehanički kontroliranim procesom valjanja (TMCP – *Thermo Mechanical Controlled Process*) (Kralj i sur, 2012.). Prema točnoj definiciji u skladu s IACS (*International Association of Classification Societies*) TMCP postupak uključuje: TMR (*Thermo Mechanical Rolling* – toplinsko mehaničko valjanje) i AcC (*Accelerated Cooling* – ubrzano hlađenje) (Tomić, 2012.). Kod navedenoga postupka se u točno definiranom proizvodnom postupku s reguliranim vremenima hlađenja dobiva ciljana mikrostrukturna

svojstva visoke čvrstoće i dobre žilavosti te dobra zavarljivost. Kod TMCP –a valjanje se odvija ispod temperature rekristalizacije te se čelik podvrgava ubrzanom kontroliranom hlađenju. Usitnjenje zrna dobiva se dodavanjem mikrolegiranih elemenata, pri čemu se postižu veličine zrna od 5 do 10 μm , što rezultira visokom čvrstoćom i dobrom žilavošću (Kralj i sur, 2012.). Svrha TMPC načina proizvodnje je postizanje mikrostrukture igličastoga ferita umjesto feritno-perlitne strukture karakteristične za konvencionalne čelike.

Metalurška svojstva TMCP čelika prikazana su na slici 2. Kontrola mikrostrukture započinje zagrijavanjem ploče. U ovom stadiju kontrolira se veličina austenitnoga zrna. Sljedeći stadij je vruće valjanje. Kontroliranim valjanjem u ne-rekristalizacijskom stadiju, oblikuje se fini austenit. Sljedi transformacija u igličasti ferit ili gornji bainit u stadiju ubrzanoga hlađenja nakon završetka vrućega valjanja. Prema slici 2 moguće je uočiti da je struktura TMCP čelika ujednačena i fino zrnata (Tomić, 2012.).

Slika 2. Koncept mikrostrukturnih promjena pri TMCP načinu proizvodnje materijala



Izvor: Tomić, 2012.

3.2. Specifičnosti čelika API 5L X80

Čelik gradacije API 5L X80 ispunjava zahtjeve kao materijal za visokotlačne cjevovode zbog visoke čvrstoće i dobre žilavosti. Kemijski sastav čelika X80, može se usporediti s kemijskim sastavom čelika X70 prema klasifikacijama iz norma EN 10 208 – 2 i API standarda i prema podacima iz do sada ostvarenih projekata (Kralj i sur, 2012.). Tablica 1. pokazuje kemijski sastav i mehanička svojstva za čelik gradacije API 5L X80.

Tablica 1. Prikaz kemijskoga sastava i mehaničkih svojstava čelika X80 prema standardima

EN 10 208 – 2 i API u usporedbi s podacima iz prakse

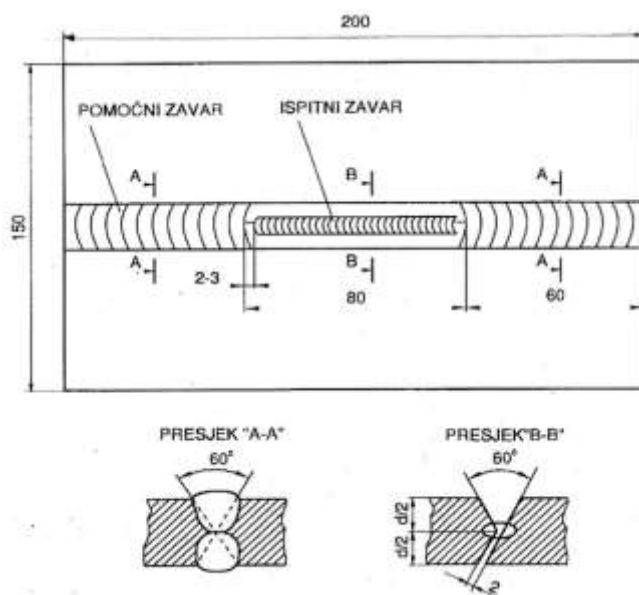
X80			
Prema standardu			
C	0,160	Si	0,450
Mn	1,800	P	0,025
S	0,015	V	0,100
Nb	0,060	Ti	0,060
Cr	0,300	Al	0,060
B	-	Ni	0,300
Mo	0,350	Cu	0,250
N	0,012		
Projekti			
C	0,067-0,100	Si	0,320-0,430
Mn	1,540-2,000	P	0,011-0,020
S	0,002-0,003	V	0,010
Nb	0,041-0,069	Ti	0,017-0,030
Cr	0,014-0,100	Al	0,032-0,050
B	0,0003	Ni	0,030-0,180
Mo	0,010-0,280	Cu	0,030-0,220
N	0,003-0,005		
Standard			
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]		555-675	
R_m [N/mm ²]		625-827	
A, %		>18	
URL [J] (0 °C)		>68-120	
Projekti			
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]		570-665	
R_m [N/mm ²]		675-805	
A, %		19,3-34,7	
URL [J] (-40/-20/0 °C)		-/105-225/116-252	

Izvor: Kralj i sur., 2012.

4. Tekken metoda

Radi se o jednostavnoj metodi zasnovanoj na dilataciji zavarenih limova. Ovo ispitivanje našlo je široku primjenu u svom osnovnom ili modificiranom obliku. Može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnoga zavarivanja i zavarivanja pod praškom, za relativno tanke limove (12 mm), kao i za one čija je debljina do 150 mm. Ispitivanje se koristi za izbor parametara zavarivanja korijenskog dijela sučeljenih spojeva (Hrivnjak, 1982.). Slika 3 prikazuje lim na koji se nanosi ispitnoga i pomoćnoga zavar. Ploča je dimenzija 200x150 mm. Priprema ispitnog zavara izveden je kao Y, dok je priprema pomoćnog zavara izvedena kao X priprema zavara.

Slika 3. Ispitni uzorak za Tekken metodu

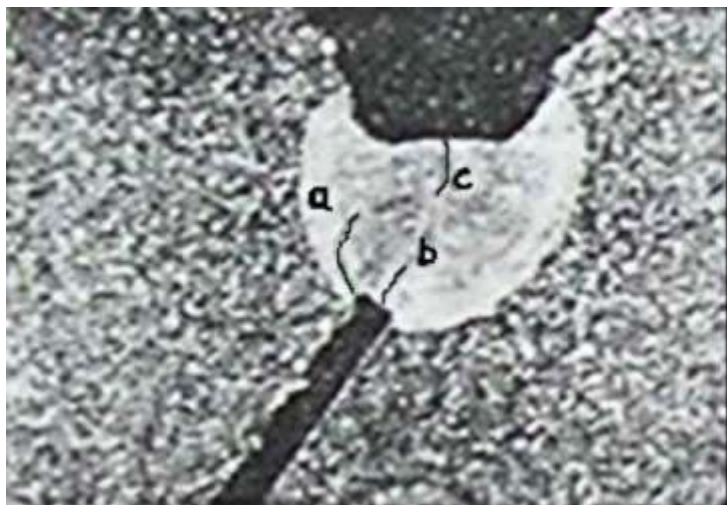


Izvor: Kralj i Dunder, 2000.

Pukotine se najčešće javljaju od prelazne zone do ZUT – a, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala. Manje je osjetljivo na promjene dodatnoga materijala.

Pri ovom ispitivanju javljaju se tri tipa pukotina. Slika 4 prikazuje ta tri tipa pukotina. Pukotina označena slovom (a) predstavlja tipičnu hladnu pukotinu (induciranu vodikom), koja se širi od ZUT – e i može se vratiti natrag do metala zavara. Pukotine tipa (b) i (c) nastaju u metalu zavara, pri čemu se mogu spajati. Ove pukotine nisu samo tip hladnih pukotina.

Slika 4. Presjek uzorka za ispitivanje Tekken s vidljivim tipovima nastalih pukotina



Izvor: Barun, 2009.

Ispitivanje se ocjenjuje metalografskom analizom na 5 isječaka, od kojih su dva iz početnoga i završnoga kratera. Iz ovih analiza se određuje % pojave pukotina po dužini uzorka u ovisnosti od parametara zavarivanja (npr. temperatura predgrijavanja). Parametar zavarivanja kao što je temperatura predgrijavanja, da bi se prihvatio mora imati uspješno izvedena 3 uzorka, znači bez pukotine. Utjecajni parametri za izbjegavanje pukotina jesu: sadržaj vodika u metalu zavora, temperatura predgrijavanja i unos topline (Barun, 2009.).

Procedura izvođenja testa (Barun, 2009.):

- prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar, pomoćnim zavarima ploča je ukružena (nema stezanja i rastezanja)
- tako zavareni uzorak se ostavi 48 sati da stoji i zatim se ispituje
- ispitivanja se vrše prvo vizualnim pregledom, zatim sa penetrantskim tekućinama, a zatim se zavar reže na tri mjesta, rade se izbrusci i promatraju mikroskopom
- u ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključujemo o sklonosti prema hladnim pukotinama

5. Eksperimentalni rad

5.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Predmet istraživanja je utvrditi zavarljivost sitnozrnatoga mikrolegiranoga čelika visoke čvrstoće za cjevovode, klasifikacije API 5L X80 sa stanovišta određivanja ekvivalenta ugljika te mogućnosti pojave hladnih pukotina pomoću računskih i eksperimentalnih metoda. Na temelju provedenih ispitivanja definirati će se kritične razine parametara zavarivanja u kontekstu eliminacije pojave hladnih pukotina i postizanja optimalnih značajki zavarenoga spoja. Metoda koja će se pri tome koristiti je Tekken metoda ispitivanja. Cilj je utvrditi da li će, unutar 48 sati, od zavarivanja Tekken proba doći do pukotina u metalu zavora ili u zoni utjecaja topline.

Za postupak zavarivanja odabran je MAG (Metal Active Gas, 135) elektrolučni postupak, a za dodatni materijal odabrana je puna žica. Varijabla koja se mijenja u eksperimentu je unos topline.

Istraživanja će se provoditi u strogo kontroliranim uvjetima, prema predviđenom sljedu eksperimenta u 2 glavne etape:

1. ispitivanje Tekken testom prema normi ISO 17642 – 2.
2. mjerenje tvrdoće na uzorcima.

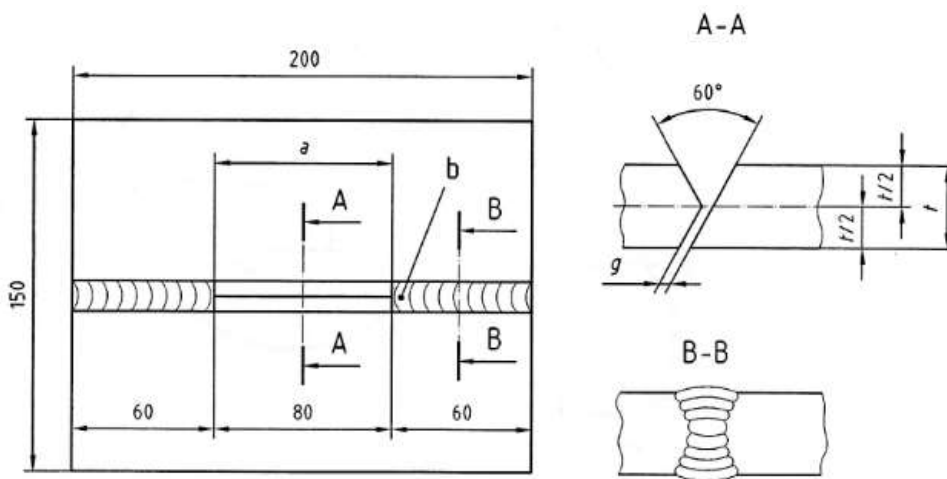
Za unose topline odabrani su parametri koji osiguravaju kvalitetan zavar. Parametri su se utvrdili prethodnim probnim zavarivanjem, pri kojem su određeni iznosi struja i napona zavarivanja, uz pomoć definirane brzine zavarivanja. Tako su odabrana tri različita unosa topline 6, 12 i 18 kJ/cm.

Uzorci za Tekken metodu izrađeni su od visokočvrstoga čelike API 5L X80, u skladu s preporukama iz norme ISO 17642 – 2. Svi uzorci su izrađeni od materijala proizvedenoga u obliku ploče. Debljina ploče visokočvrstoga čelika iznosila je 10 mm, a dimenzije ploča za Tekken ispitivanje bile su 200x150 mm.

5.2. Ispitivanje zavarljivosti Tekken testom

Ispitivanje zavarljivosti uzoraka Tekken testom provodilo se na epruvetama koje su bile izrađene iz materijala gradacije API 5L X80. Epruvete su izrađene i ispitivanje je provedeno prema normi ISO 17642 – 2:2005 (E). Na slici 5 prikazan je detalj iz navedene norme. Detalj prikazuje Tekken probu s naznačenim dimenzijama i izvučenim presjecima koji prikazuju pripremu ispitnoga i pomoćnih zavara.

Slika 5. Prikaz ploče za Tekken probu i presjecima ispitnoga i pomoćnoga zavara (ISO 17642 – 2, 2005.)



Izvor: ISO 17642 – 2, 2005.

Prema preporukama norme duljina pomoćnih zavora je trebala biti oko 60 mm, a ispitni zavar je trebao imati dužinu oko 80 mm.

Strojnomo obradom pripremljene su četiri ploče za Tekken ispitivanje. Planom pokusa određeno je da će unos topline biti parametar koji će se mijenjati. Ploče su označene brojevima od 1 do 4, s tim da ploče 1 i 4 imaju iste parametre zavarivanja, ali ploča 4 bila je prije zavarivanja namjerno podhlađena na 0 °C, dok su ostale ploče zavarivane bez predgrijavanja ili pothlađivanja, na okolišnoj temperaturi od 20 °C.

Tablica 2. Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentalnom radu

Broj ploče	Vrsta struje i polaritet	Struja, A	Brzina žice m/min	Napon, V	Promjer žice	Protok zaštitnog plina, l/min	Brzina zavarivanja cm/min	Nagib elektrode, °	Unos topline, kJ/cm
1	DC, +	176	6,8	20	1,2	18	30	90	6
2		192	9	22,3			20		11,7
3		280	13	33,5			25		19
4		176	6,8	20			30		6

Izvor: Vusić, 2014.

Slika 6. Zavarivanje ispitnog zavora na pločama od 1 do 3 (Vusić, 2014.)

- 6.1. zavarivanje ispitnoga zavora na ploči 1
- 6.2. zavarivanje ispitnoga zavora na ploči 2
- 6.3. zavarivanje ispitnoga zavora na ploči 3
- 6.4. mjerenje udaljenosti sapnice od radnoga komada





Slika 6.3.



Slika 6.4.

Izvor: Vusić, 2014.

Slika 7. Zavarivanje ispitnoga zavora na ploči četiri (Vusić, 2014.)

7.1. mjerenje temperature pothlađene ploče

7.2. priprema radnoga komada i namještanje sapnice

7.3. i 7.4. zavarivanje ispitnoga zavora na ploči 4



Slika 7.1.



Slika 7.2.



Slika 7.3.

Slika 7.4.

Izvor: Vusić, 2014.

5.3. Mjerenje tvrdoće prema HV10

Mjerenje tvrdoće izvedeno je metodom Vickers HV10 na makroizbruscima napravljenih od Tekken uzoraka. Slika 8 prikazuje izgled makroizbruska i raspored mjerenja. Mjerenje tvrdoće provodi se zbog utvrđivanja maksimalne vrijednosti tvrdoće zone zavara. API standard navodi kako izmjerena vrijednost tvrdoće, za ovu vrstu materijala, ne bi smjela biti viša ili jednaka 345 HV10. Također, prema normi HRN EN 10208-2:1996 utvrđena je oznaka čelika, prema stanju isporuke materijala, koja glasi L555MB. Prema normi CEN ISO/TR 20179-2009 koja služi za razvrstavanje čelika, spomenuti čelik pripada skupini 2.2. I normom HRN EN ISO 15614-1 utvrđeno je kako maksimalna vrijednost tvrdoće zavarenoga spoja ne bi smjela iznositi više od 380 HV10. Zbog toga je vrlo važno provođenje mjerenja tvrdoće kako bi se osigurala sigurnost i strukturni integritet konstrukcije (Tomić, 2012.).

Slika 8. Izgled makroizbruska i raspored mjerenja (Vusić, 2014.)



Izvor: Vusić, 2014.

Mjerenje se provodilo u svim zonama zavarenoga spoja i u osnovnom materijalu. S ciljem ostvarivanja preciznijega rezultata linijski su se u svakoj zoni provela po minimalno tri mjerenja, kao što je prikazano na slici 8. S obzirom na broj makroizbrusaka, provedena su prema mjernim točkama 60 mjerenja. Mjerenja nisu provedena na svih 12 makroizbrusaka, već se od svake Tekken probe uzimao po jedan uzorak za mjerenje tvrdoće kao reprezentant. U ovom opsegu istraživanja

mjerenje tvrdoće na jednom od tri makroizbruska na svakoj Tekken probi zadovoljava točnost rezultata.

Kod mjerenja vrlo je bitno bilo zadržati određeni linijski razmak između otisaka u vrijednosti od minimalno 4 dijagonale mjerne točke kako bi se spriječio utjecaj lokalnoga otvrdnjivanja na rezultat mjerenja. Mjerenje se, kako je ranije napomenuto, izvodilo metodom HV10.

Tablica 3. Vrijednosti mjerenja HV10

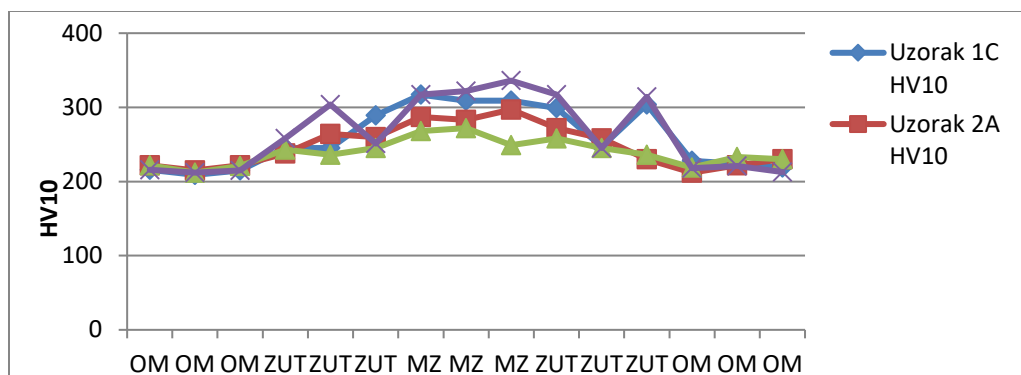
Mjesto mjerenja	Uzorak 1C HV10	Uzorak 2A HV10	Uzorak 3A HV10	Uzorak 4C HV10	API norma, do maks. vrijednosti
Osnovni materijal (OM)	216	222	222	216	380
OM	209	215	212	212	
OM	215	222	221	215	
ZUT	245	238	243	258	
ZUT	245	264	236	304	
ZUT	289	260	245	251	
Metal zavora (MZ)	317	287	268	317	
MZ	309	283	272	322	
MZ	309	297	249	336	
ZUT	299	272	258	317	
ZUT	247	258	245	245	
ZUT	304	230	236	314	
OM	228	212	219	218	
OM	224	222	233	221	
OM	219	230	230	213	

Izvor: Vusić, 2014.

Uspoređujući sve rezultate mjerenja moguće je zaključiti kako nema prevelikih odstupanja u rezultatima mjerenja između mjernih zona. Povećana vrijednost tvrdoće zabilježena je u području metala zavora i zone utjecaja topline kao posljedica pogrubljenja zrna.

S većim unosom topline nije došlo do povećanja iznosa tvrdoće jer je hlađenje bilo sporo. Najviše izmjerene tvrdoće bile su na Tekken probi četiri iz razloga pothlađivanja probe na 0 °C prije zavarivanja pa je i intenzitet odvođenja topline za vrijeme hlađenja bio najviši što je rezultiralo najvišom tvrdoćom.

Slika 9. Usporedba HV10 za sva četiri uzorka



Izvor: Vusić, 2014.

Prema provedenim mjerenjima moguće je zaključiti kako unos topline nema značajan utjecaj na vrijednosti tvrdoće u zonama zavora. Obrazloženje leži u tome da ovaj čelik prema načinu proizvodnje, stanju isporuke, količini legirnih elemenata i manjem udjelu ugljika pripada skupini čelika koji imaju dobru zavarljivost i kod kojega nisu za očekivati velike heterogenosti u materijalu kroz zone zavarenoga spoja.

6. Zaključak

U ovom radu opisan je pojam zavarljivosti materijala, proizvodnja i specifičnosti čelika za cijevi API 5L X80, te su ispitivana svojstva zavarljivosti čelika klasifikacije API 5L X80 uz pomoć eksperimentalnih metoda.

U eksperimentalnom dijelu rada koristila se Tekken metoda ispitivanja, a zavareno je bilo četiri Tekken probe. Parametar koji se mjenjao kod zavarivanja bio je unos topline, te je jedna od proba pothlađena ispod sobne temperature.

Mjerenjem tvrdoće, na pripremljenim uzorcima, dobiveni su približno jednaki rasporedi tvrdoća po pojedinim zonama na svih četiri uzorka. Takav rezultat mjerenja sugerira da se radi o čeliku dobre zavarljivosti. Još jedan pokazatelj dobre zavarljivosti čelika klasifikacije API 5L X80 na temelju mjerenja tvrdoće jesu maksimalne izmjerene tvrdoće koje su niže od klasifikacijama određene tvrdoće 380 HV10.

Literatura

1. Filetin, T. i dr. (2006). Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

2. Novosel, M.; Kralj, S. (1991). Čelici povišene i visoke čvrstoće. *Zavarivanje* 34, 3-4, 101-108.
3. Anzulović, B. (1978). Zavarljivost i pravilo odlučivanja u zavarivanju , *Zavarivanje* 21, 3 ; originalni tekst: Gatto, F.V. Weldability and Sound Welding Decisions , *Welding Journal*“ br. 3/78
4. Kralj, S. i dr. (2012). Sklonost čelika API 5L X80 prema hladnim pukotinama, *Zavarivanje* 55, 1/2, 5 – 13
5. Tomić, T. (2012). Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80. Doktorski rad, FSB Zagreb.
6. Hrivnjak, I. (1982). Zavarljivost čelika. IRO „GRAĐEVINSKA KNJIGA“, Beograd.
7. Kralj, S.; Dunder, M. (2000). Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25 CrMo4 i Ck 45 prema nastajanju hladnih pukotina. *Zavarivanje* 43, 1/2, 5 - 16
8. Barun, T. (2009). Primjena Tekken metode za ispitivanje hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju. Diplomski rad, FSB, Zagreb.
9.: Norma ISO 17642-2 (2005). Destructive tests on welds in metallic materials – Cold Cracking tests for weldments – Arc welding processes, 2. dio.
10. Vusić, F. (2014). Zavarljivost čelika visoke čvrstoće. Završni rad, FSB, Zagreb.